

地中送電用シールドトンネルにみる深部地下施工の課題と対策

PROBLEMS AND COUNTERMEASURES IN DEEP SHIELD TUNNEL FOR ELECTRIC POWER TRANSMISSION

大塚正博*・山崎 剛**・高瀬正司***

Masahiro OOTSUKA, Takeshi YAMAZAKI, Masashi TAKASE

Due to the Special Measures Act for Public Use of Deep Underground, the possibility of utilizing underground space is increasing. However, peculiar problems often occur in deep underground construction. Deep shield tunnels for electric power transmission whose covering are 40m or more have been constructed by TEPCO. In this paper, the examples of water leakage, damage of shield machine and segmental lining seen in the construction sites are reported. The countermeasures against these problems in deep tunnel construction are also mentioned.

Key Words: deep underground, shield tunnel, segmental lining, shaft

1. はじめに

大深度地下使用法により，地下空間の活用可能性は高まりつつあるが，大深度地下の施工においては深部がゆえの特徴的な課題が発生しているのも事実である。

東京電力の地中送電用シールドトンネルには，GL-40mを越える深部地下において各種の地質条件や周辺環境のもとに施工された実績がある。

本稿ではこれら実績の中から高水圧下での立坑工事における漏水，硬質地盤掘削におけるシールドマシンやセグメントの損傷事例を紹介する。また，これら事例を分析し，深部地下のシールドトンネル施工における課題と対策について論じる。

2. 立坑工事

シールドトンネルの立坑は掘削深さが大深度になる場合，一般に地中連続壁工法やケーソン工法によることが多い。このような立坑工事における課題としては高水圧下における土留め壁及び掘削底面の安定性，漏水等の問題が挙げられる。ここでは当社の立坑工事実績からこれらの問題が顕在化した事例とその対応策について述べる。

キーワード：深部地下，シールドトンネル，セグメント，立坑

* 正会員 工博 東京電力株式会社 送変電建設部 管路グループマネージャー

** 正会員 東京電力株式会社 配電部 配電環境技術グループマネージャー

***正会員 東京電力株式会社 送変電建設部 管路グループ

2.1 連続地中壁工法での盤ぶくれ

(a) 工事概要

工事箇所：東京の下町低地地区

地質：上位より有楽町層（ $N=0\sim3$ ）、7号地層（ $N=4\sim10$ ）、東京層（ $N>30$ ）である。

立坑規模：幅 7.8m×長さ 23.8m×床付深さ 37.5m、土留め壁先端までの深さ 44m

(b) 盤ぶくれ状況

工事は立坑床付けが7号地層の砂混じりシルトであったことから、急激な崩壊は生じないであろうとの予測を元に工事が進められた。

GL-35m 掘削時に1箇所から少量の湧水が始まった。床付けまで掘削した時点で湧水位置が2箇所になり、部分的に鉄筋入りの基礎コンクリートを打設した。湧水量としては約 100L/min で少量の流砂が見られた。

その翌日、基礎コンクリートにクラックが入る。湧水には前日と大きな変化はなかったが、その日の午後湧水が 350～500L/min に増大し、立坑に注水した。GL-22m の水位で地下水の流入はほぼ静止した。

(c) 床付け付近の挙動

本格的に湧水が発生した時点では、土留め背面の水圧が急速に低下しはじめ、根入れ部分が内側に変位した。それに伴い土留めの鉄筋応力も増加している傾向が伺えた。

水圧の低下にも係わらず、根入れ部が内側に変形する現象については詳細な分析が必要であるが、地下水の浸透とともに土砂が根入れ部を回り込むように床付け面へ移動しようとするためではないかと考えられる。

(d) まとめ

深部になるほど一般に地盤は堅固になるが水圧は増大する。粘着力が大きい粘性土の場合は水圧に作用されない強度を有する。一方、砂質土の場合はN値などで評価されるように、周辺の拘束下では見かけの強度を有するが、一端掘削などにより拘束圧が解放されると強度が急速に低下し、浸透流と共に崩壊する危険性を秘めている。特にこの現象は深部になればなるほど顕在化するものと思われる。

従って、地質調査においてはN値と共に採取される資料を用いて細粒分含有率等による土質判定、連続サンプリングによる粒度構成、固結状況、連続性等を評価し、土留め壁の根入れ長や補助工法などを慎重に決定することが重要となる。

更に施工段階においては連続地中壁の打設精度の確保はもちろんのこと、特に隣り合うガット間の水密性を確実に確保する品質管理が重要である。また、溝を掘削する段階で同時に根入れ部付近の地質情報が入手できるような技術が開発されることが望ましい。

また、地盤強度は部分的な弱点があっても周囲の良質な部分が荷重を分担して支持できるが、水みちについては一箇所でも存在するとそれが全体崩壊に繋がる可能性が高い。

2.2 連続地中壁及びケーソン立坑の漏水

(a) 工事概要

当工事は運河を挟み両岸に立坑を建設しシールドで連係するものであり、両立坑はそれぞれ11角形連続壁及び円形ニューマチックケーソンである。

（工事箇所）神奈川県内の埋め立て地

（地質）上位より埋土層（ $N=0\sim10$ ）、有楽町層（ $N=0\sim10$ ）、下末吉層（ $N>50$ ）である。

（立坑規模）連続壁 11角形連続壁：掘削内径φ8.5m×床付深さ 36.5m、土留め壁先端までの深さ 62m

円形ニューマチックケーソン：掘削内径φ8.6m×床付深さ 37.5m

(b) 設計と工法選定

連続壁立坑においては深部の土水圧に経済的に耐え得るため形状を円形に近い11角形の連続地中壁とし、支保工効果と連続地中壁ジョイント間のずれ防止を図るため、本体コンクリートは掘削段階から「逆送工法」を採用した。一方ケーソン立坑においては、高水圧下での作業環境対策として大気圧下から掘削を制御する無人ニューマチックケーソンを採用した。

(c) 漏水状況

工事竣工後数年を経過した時点では、本体コンクリート打継目から漏水が見られており、それぞれの工法で差異が見られている。漏水はいずれもにじみ程度ではあるが、逆巻き工法を採用した連続地中壁工法は、ケーソン工法に比べて漏水が顕著であった。

ケーソン工法が漏水上優位であったのは、逆巻き工法にくらべ地上で十分な打継目処理と締め固めが可能な環境下で現場製造されたことが主な理由であると考えられる。深部高水圧下ではこのような打継目対策が重要なポイントである。

2.3 ニューマチックケーソンでの減圧対策

ニューマチックケーソン工法は前項の工事の後、東京電力の工事で多用されたが、特に大深度掘削に置いては減圧対策に課題が生じている

(a) 工事概要

事例 1：（工事箇所）千葉県下総台地

（地質）砂質土を主体とする洪積層（ $N=20-50$ ，深部では $N>50$ ）

（立坑規模）幅 8.6m ×長さ 12.1m ×床付深さ 51m ，矩形

事例 2：（工事箇所）千葉県下総台地河谷低地部

（地質）GL-15m 迄は腐植土層，それ以深は砂質土層（ $N=30-50$ ，深部では $N>50$ ）

（立坑規模）幅 8.6m ×長さ 12.3m ×床付深さ 42m ，矩形

事例 3：（工事箇所）東京低地部

（地質）GL-27m 迄は軟弱粘性土層，それ以深は砂質土層（ $N=20-50$ ）

（立坑規模）幅 8.3m ×長さ 12.3m ×床付深さ 49m ，矩形

(b) 減圧対策と課題

これら 3 件の工事はいずれも計画最大作業気圧が 0.3MPa 以上となるため、当時の労働省に申請し圧気圧の減圧について指導を頂き対策を講じている。

事例 A では砂質土を主体とする地盤であったことからディープウェルによる地下水低下工法を、事例 B、C では上位に軟弱粘土層が堆積していることから、地下水低下工法と地盤改良を併用した。

工事は 3 事例とも順調に進み無事完成を見ているが、現時点から見た課題としては監督署から指導された最大作業気圧に違いが見られたことが挙げられる。施工会社の報告によれば、事例 A では 0.4MPa 、B で 0.35MPa 、C で 0.3MPa となっている。これらの値の違いは減圧対策の規模にも影響することから、最大作業気圧の考え方については法的にも整備していく必要があると考えられる。

2.4 多角形連続地中壁工法での改善事例

深部におけるニューマチックケーソンの減圧対策と、硬質地盤での切削効率の問題から再度大深度立坑に連続地中壁工法を採用するにあたり改善を行った事例を紹介する。

(a) 工事概要

（工事箇所）神奈川県，下末吉大地を浸食した河谷低地

（地質）砂質土を主体とする洪積層（ $N=20-50$ ，深部では $N>50$ ）

（立坑規模）掘削内径 $\phi 12.5\text{m}$ ×床付深さ 52.5m ，土留め壁先端までの深さ 57.5m

(b) 工法の工夫

2.2 の事例と同様に大深度での土水圧に対する抵抗性を効率的に高めるため、平面形状は円形に近い多角形（12 角形）を採用した。また前事例の欠点を踏まえ、本体コンクリートについては順巻き工法を採用し、継手部のずれに対しては仮設時のリングビーム設置により対応した。結果的に工事は順調に進み、供用後も漏水等は見られていない。

3. 深部におけるシールド工事

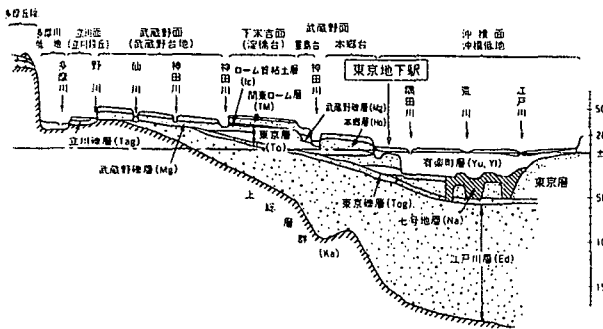
大深度でのシールドトンネルにおいては、シールドマシンの発進や到達のための立坑間のスパンが長く、必然的に長距離施工が求められる。シールド掘進が長距離化すると、諸資材の搬入や掘削土砂の搬出システム、動力の中継、トンネル内の換気、作業員の安全衛生への配慮も重要となる。しかし、大深度長距離施工で第一に重要なのは、硬い地盤で掘削するシールドマシンの強度や耐久性、トンネル覆工へ作用する荷重に関する項目である。

ここでは当社の深部シールド工事においてシールドとセグメントに生じたトラブルを事例として紹介し、深部化した場合の課題と対策について提起したい。

3.1 シールドマシン

大深度になるほど地盤は一般に強固になるがその特性によって掘削性は当然異なる。首都圏の深部地下地盤には砂を主体とする江戸川層や、固結シルトである土丹を主体とする上総層群が挙げられる(図一1)。江戸川層はN値が50以上であるが未固結で均等係数が小さく、地下水位が高いことと相まって崩壊しやすく均質に改良することが難しい地盤である。東京電力の工事における過去の地下水噴発によるトラブルはこの江戸川層に多く見られる。ただし未固結であることから、シールド掘削ではそれほど大きなカッタートルクを必要としない。一方、固結シルトを主体とする土丹層では粘着力が大きく自立性が高い。従ってシールド掘削に大きなカッタートルクを要し、切削時間も増大する傾向にある。

ここでは当社工事において、表一1に示すように洪積砂質土及び土丹であり、掘削径及び掘削延長が概ね同程度であるシールド工事でのシールドマシンの故障実績を整理し、比較した結果を述べる。



図一1 東京23区の模式的な地質断面図(東京土木研究所, 1977)

(a) 掘進効率とトラブルの傾向

表一1 から分かるように土丹の掘進速度は洪積砂質土の約6割に低下し、その反面推力及びカッタートルクは1.7倍となっている。更に土丹層においては推進速度を上げようとした場合、カッター切削速度が追いつかないと無理にカッター面版が地山に押しつけられることとなる。その結果、推進力やカッタートルクを

表一1 硬質砂質土と土丹における掘進実績の比較

現場		洪積砂質土 (A現場)		土丹 (B現場)		
工区		A-1	A-2	B-1	B-2	
粘着力 c (kgf/cm ²)		$c_0 \approx 0.15$		$c_0 \approx 18$		
内部摩擦角 ϕ (°)		$\phi_0 \approx 35$		$\phi_0 \approx 17$		
変形係数 E (kgf/cm ²)		$E_{90} \approx 200$		$E_{90} \approx 5600$		
シールド工法		泥水		泥水		
掘削径 (m)		4.5		5.2		
掘削延長 (m)	TOTAL	3960		3550		
	シールド 1 台当り	2260	1700	2400	1150	
最大土被り (m)		19m	11m	40m	50m	
最大地下水位 (kgf/cm ²)		1.4	0.5	3.8	4.8	
カッタートルク (tf・m)	駆動方式	電動	電動	油圧	油圧	
		常用	132	111	135	190
	装備	最大	198	133	203	285
		実績 平均値	50	34	63	84
	カッター最大回転数 (r.p.m)		1.3	1.05	1.1	1.0
掘進速度 (mm/min)	全数作動 時	73	51	58	57	
	実績 平均値	40	35	24	20	
総推力 (tf)	装備	1920	1800	2400	2700	
	実績 平均値	850	600	1260	1200	
急曲線		50R		20R	20R	
		1箇 所	無し	4箇 所	4箇 所	

異常に上昇させるだけでなく、カッター面版や軸にも異常な力を与え、損傷を引き起こすという悪循環に陥ることがある。実際、表一2 に示すように土丹層の方が故障件数、故障時間共に大きくなっている。従って土丹層においては面版の切削速度とバランスの取れた推進速度で掘進することが肝要である。

(b) ビットの摩耗

硬い土丹層を効率的に切削するため、B 工事のビットにはそれぞれ次の特徴があった。

B-1 工区においては大きな先行ビットが同心円状に溝を切り、その後メインビットがすくい取る方法となっていた。B-2 工区においてはメインビットで直接切削することを基本としており、補助的に先行ビットは付いていたもののその大きさも B-1 工区の 1/4 程度であった。

両工区の施工後ビットの損傷及び摩耗調査を行ったが、メインビット摩耗については両工区とも通常摩耗の範囲であり特段問題はなかった。しかし、B-1 工区における先行ビットの高さはメインビットよりも 50mm 高く設定されていたが、掘削後はほぼメインビットと同じ高さ、すなわち 45～50mm 摩耗している結果となった。また、B-2 工区においては掘進途中にトラブルを生じカッター面版を観察する機会があった。その時点で先行ビットは全数欠落していた。再度先行ビットを設置し直し、再掘進したが、到達後の摩耗量は B-1 工区同様メインビットの高さまで摩耗していた。

現在では長距離対応のビット、交換や延命化など耐摩耗技術の進歩がめざましいが、特に土丹層においてはカッターの高トルク化、高回転数化やシールドジャッキの推力増強といった機械的な能力向上がかえってビットの摩耗および欠損を招く一因ともなり得ることを考慮する必要がある。

(c) コピーカッター・面版スリット開閉装置の損傷

土丹層を掘進した B 工事では、曲線部以外の箇所においても地盤から受ける抵抗を低減するため、コピーカッターを常時使用し余堀を大きくしていた。結果して B-1, 2 工区ともコピーカッターの欠損およびジャッキ軸の変形が生じ、後者については掘進を停止して交換に到った。

また、B-1 工区においては当時としては長距離施工であったことから、チャンパーからビット交換ができるよう面版にジャッキで開閉ができるスリットを設け、開口部がビット交換時にスリットで塞げる構造となっていた。掘進中にチャンパー内に入り状況を確認したところ、スリット開閉板の変形およびスリット開閉用ジャッキの折損が見られ機能を有しなくなっていた。

カッタービットの摩耗や欠損対策技術と同様、これらの部位についても現在では掘進実績の蓄積に伴い改良が重ねられていると思われるが、土丹層では懸念すべき要素である。

(d) テールシールの損傷

B 工事においては B-1 工区および B-2 工区それぞれにおいて、テールシールを途中で 2 回交換している。これは掘進中に切羽からシールドマシン周辺を通じて回り込んだと思われる泥水がテール部分から漏れだしたことによる。

当工事では泥水加圧式を採用したが、高水圧ゆえ切羽面に作用させる泥水圧も高い値となっていた。加えて掘進抵抗を小さくするために多少の余堀を行いながら施工した。このためシールドテールと地盤との空隙が通常よりも大きく、テールシールには切羽面での泥水圧が伝わりやすい状況であったことが推察される。このため、テールシールが損傷し切羽面の安定のため作用させていた高い圧力の泥水がテールクリアランス部を通じて漏出したと考えられる。テールシールの損傷は次のステップで進むものと思われる（図一2）。

①テールクリアランスの増加：テールクリアランスはシールドマシンの姿勢制御により最大 50～60mm 程度になる。さらにテールエンド部分のクリアランスは曲線施工で増大する。

表一2 洪積砂質土と土丹における故障実績の比較

故障箇所	洪積砂質土 (A 現場)		土丹 (B 現場)	
	故障件 数(件)	故障時 間(hr)	故障件 数(件)	故障時 間(hr)
切削システム (カッター系)	1	2	24	628
推進システム	4	62	51	190
泥水輸送システム	29	227	125	285
泥水処理システム	25	511	54	84
その他	13	123	90	868
全体	72	925	344	2055

②裏込め材の流入・硬化：テールエンド部分でクリアランスが大きくなった時に、一般的なテールシールであるワイヤーブラシまたはワイヤーブラシ背面に裏込め材が流入する。この侵入が繰り返行われる中で裏込め材は硬化し、テールクリアランス部に蓄積し閉塞させていく。

③ワイヤーブラシの引裂き：流入した裏込め材の硬化とテールクリアランス閉塞に伴い、本来柔軟に変形できるワイヤーブラシの機能が阻害される。この状態で掘進線形やシールド姿勢制御でシールドテールとセグメントとのクリアランスが小さくなると、ワイヤーブラシがシールドテールとセグメントに挟み込まれた状態

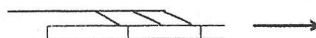
でシールドが前方に推進する状態となり、ワイヤーブラシがせん断力により引きちぎられてしまう。この状態が逐次進展することによりテールクリアランス部分の耐水圧性能が低下する。

以上に記述したテールシールの損傷は、特に高水圧下になるほど顕在化してくるものと考えられる。対策としては裏込め注入材のテールクリアランス部分への侵入防止が効果的である。具体的にはテールグリスの注入管理やテールブラシに発砲ウレタンを注入したウレタンシール等の採用が考えられる。

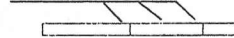
さらにテールクリアランスに裏込め注入材が侵入硬化することの弊害として、後述するようにシールドテールからセグメントへ大きな荷重が作用し、その結果リング間継手やセグメント本体を損傷させるという問題も発生している。

①テールクリアランスの増加

通常の状態

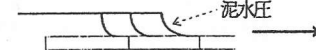


クリアランスの増大（急曲等で）

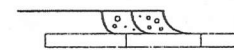


②裏込め注入の浸入・硬化

泥水圧によりテールが変形



流入した裏込・土砂が固結



③ワイヤーブラシの引裂き

クリアランスが減少



ブラシに大きな力が作用し脱落。



図-2 テールシールの損傷ステップ

3.2 セグメント

深部地盤においては高水圧となることから必然的に切り羽圧が増大し、鋼殻部の部材厚の増加にともないシールドマシンの重量も増大する。その結果、推進ジャッキの装備容量は大きくなる傾向にある。一方、高水圧に加え地盤反力も大きくなることにより、円形のセグメントに発生する断面力は曲げモーメントにくらべ軸力が卓越するため、土水圧に対してはセグメントの部材厚さを大きくすることなく作用断面力に抵抗できる。電力用トンネルのような中小口径のシールドセグメントの設計では、供用時の土水圧が部材厚さを支配されていることを考慮すると、深部化の割にはセグメントが薄く設計できる方向となる。従って現状設計の延長ではセグメントが薄肉傾向になる反面、シールド推進力の増大などに伴いセグメントがシールドマシンから受ける荷重が増大するため、深部においては施工時荷重がセグメント与える影響が大きくなる。

実際に施工時荷重によるセグメントへの影響が顕在化した事例を以下に示す。

(a) シールドマシンテールの「せり」によるセグメントの損傷 損傷状況

①鉄筋コンクリート製ボックスタイプ：リング間継手において図-3に示すようにセグメント表面に半月状のひび割れが生じた。当初はひび割れ形状からみてセグメント表面における薄層剝離と考え、リング間接合面内側のエッジ部分に緩衝材を

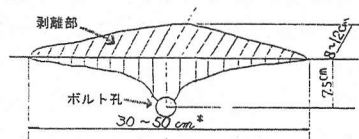
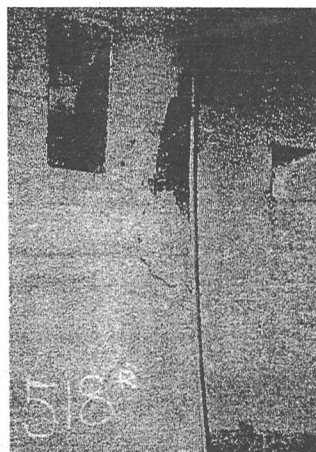


図-3 RCボックス継手セグメントの損傷。

貼ってみたものの状況は改善されなかった。そこで、ひび割れ面に沿って浮き上がり部を剥がしたところ、図一3に示すようにリング間接合ボルトを起点としてラップ状に突き上げられ剥離していることが判明した。

②鋼製ボックスタイプ：

リング間継手のセグメント面外方向のせん断力により図一4に示す損傷が見られた。特徴的な損傷としてはリング間継手面プレートの面外変形、金物継手の定着筋沿いのひび割れ、セグメント本体配力筋沿いのひび割れが発生している。

上記の2タイプとも、

損傷が発生した位置は平面緩曲線部におけるトンネルのスプリングライン付近であり、片側はリング間ジョイント切羽側継手部、もう片側は坑口側継手部と両側面で反対に分かれた。

損傷原因

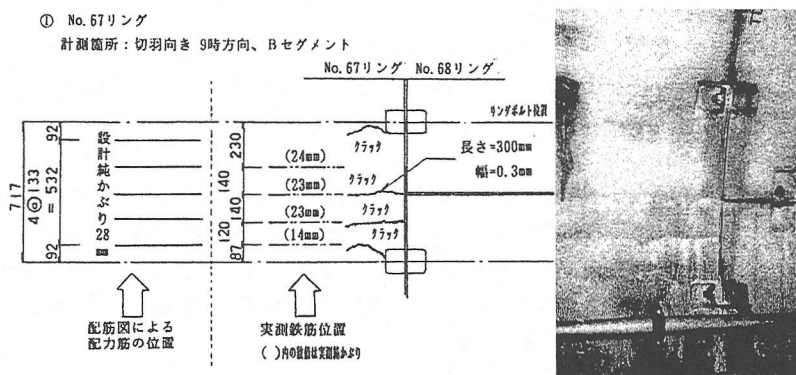
セグメントの損傷原因を検討した結果、シールド姿勢制御時に図一5に示すようにシールドテール端部とセグメントとの干渉、すなわち「せり」が発生し、それによる荷重がセグメントリングをせん断しリング間継手部を損傷させた可能性が高いことが判明した（図一6参照）。

このような損傷に至った背景は次のように集約される。

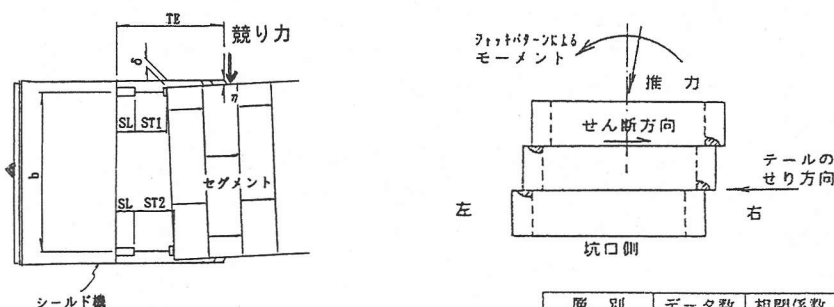
①シールドテール長の増加：以前のシールドにくらべ、テールクリアランスはあまり変化していない一方、シールドテール長が急速に長くなり、「せり」が生じやすくなったこと。直径φ3～5m級のシールドにおけるテールクリアランスは25～30mm程度と従前と変化していないがテール長は軸方向挿入型 Key セグメントの採用、長距離高速化に伴うテールシールド段数の増加により約1m長くなっている。

②掘進管理面：シールド姿勢制御においては、自動化が促進されているものの計画線形に対する精度確保に比重が置かれており、セグメントとシールドの位置関係は掘進管理に取り込まれず現場対応で行われることもあった。

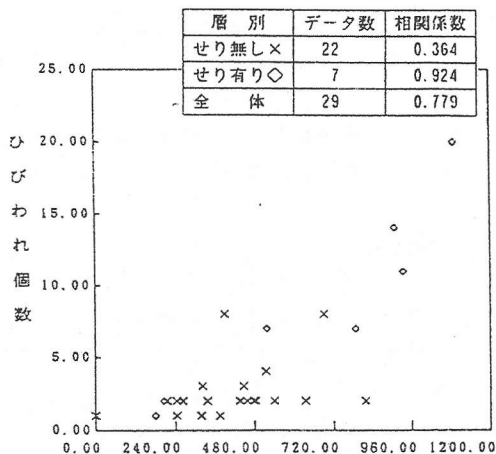
③裏込め注入の侵入硬化：裏込め注入はテールボイド発生と同時にテールエンドに近い位置で実施されるが、



図一4 鋼製ボックス継手セグメントの損傷



図一5 シールドマシンとセグメントとの「せり」



図一6 セグメントのひびわれと「せり」との関係

前述のように曲線部等において裏込め注入がテールエンドクリアランス部分に侵入しやすくなる。その結果、裏込め注入がテールシールであるワイヤーブラシ部で硬化することにより、シールドテールからの「せり」による荷重を受けるようになる。

④セグメント設計面：セグメントリング間継手の強度設計にこのような「せり」による直接せん断を考慮した設計が行われておらず、リング間継手の強度およびせん断に抵抗する締結力（摩擦力）が十分でない可能性があった。

対策

①シールドテールとセグメントを干渉しにくくする：テールクリアランスに重点を置いた掘進管理やウレタンシール等の採用検討が考えられるが、施工上の問題は施工精度の向上により解決されつつあると期待する。

②セグメント設計荷重として考慮する：セグメント設計者が施工時でも特殊なせり荷重を考慮すべきかどうかは意見が分かるところであるが、設計時の想定荷重にとりこむことも考えられる。

(b) 推進反力によるセグメントの損傷

損傷状況

シールドのジャッキ推力に対するセグメントの強度確認には、通常 key セグメントを用いた圧縮試験が行われる。地下水圧が高く、土丹層で用いられるセグメントの設計を行い、製作された Key セグメントに対し、当試験を行った結果では所定の荷重(1500kN)まで作用させても、ひび割れなどの問題が発生しないことを確認した。ところが、A 型のセグメントを 3 ピース用い図-7 に示す試験を行ったところ、1100kN でセグメントのトンネル軸方向にひび割れが生じた。

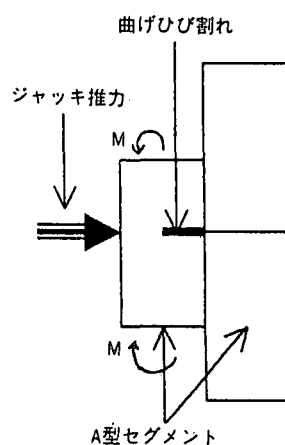


図-7 A型セグメント3ピース実験

損傷原因

損傷原因は土水圧による設計上の部材厚さが比較的薄くなったこと、加えて同一分割数の中では比較的トンネル径が大きくセグメントピースの弧長が長くなったことが考えられる。すなわち、セグメント弧長の長い板構造として解釈でき、A型セグメントが面内変形を受けたことでトンネル軸方向のひび割れが生じたと考えられる。現在ではセグメントの分割数を低減する傾向にあるが、このような影響も考慮すべきである。

対策

セグメントを板要素に置き換え、千鳥組にしたモデルの解析を実施して発生応力を推定し、その応力に抵抗できるような板厚、弧長、鉄筋補強などを検討することが適当ではないかと考えられる。

4. おわりに

東京電力が過去に実施した深部地盤での立坑及びシールド工事の事例を紹介し、特に大深度のトンネルにおいては施工時の影響が構造物に与える影響が大きく、これらを合理的に設計に反映することが求められることを示した。一方、大深度におけるシールドトンネルにおいては供用時のセグメントの止水が重要な要素となる。当社ではセグメントシールの合理的な設計についての研究^{1), 2)}も行っており、これらを踏まえて深部におけるトンネルの設計体系について開発を進めている。

5. 参考文献

- 1) 大塚・塩冶・小林・小泉：水膨張シール材の長期的な耐久性の評価について，土木学会論文集 No.707/IV，2002.6
- 2) 大塚・塩冶・小林・小泉：シールド工事用セグメントの水膨潤シールによる止水設計法について，土木学会論文集 No.651/IV，2000.6